I - L'effet photoélectrique

En 1886, le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz réalisa expérimentalement qu'un **matériau métallique exposé** à la **lumière** pouvait **émettre** des **particules chargées négativement** (qui porteront le nom « d'électron »). Cette découverte fut baptisée au nom de **l'effet photoélectrique**. Malheureusement, Hertz ne fut pas en mesure d'expliquer théoriquement le phénomène, car certaines caractéristiques de cet effet ne fonctionnaient pas avec la théorie classique de l'électromagnétisme de l'époque.


H. R. Hertz
(1857-1894)

Application de la collision d'un photon

De nos jours, une variante à l'effet photoélectrique est utilisée dans plusieurs composantes électroniques (les électrons ne sont pas éjectés, mais subissent des variations d'énergie potentielles électriques pouvant générer des courants électriques).

Cellule photoélectrique :

Capteur photosensible dont la résistance varie selon l'exposition à la lumière. Cette cellule est utilisée par exemple pour activer des systèmes d'éclairage automatisés.

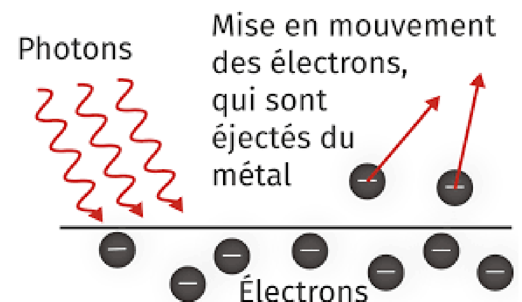

Détecteur de luminosité

Cellule photovoltaïque :

Composante électronique qui génère une tension électrique de l'ordre de 0,5 V lorsqu'elle est exposée à la lumière. Cette cellule est utilisée par exemple dans les panneaux solaires.


Panneau solaire

Interprétation de l'effet photoélectrique



1. HYPOTHÈSE D'EINSTEIN

Pour extraire un électron dans un métal il faut fournir de l'énergie appelée énergie d'extraction. Einstein interprète l'effet photoélectrique en formulant les hypothèses (ou postulats) suivantes.

- la lumière est constituée par un ensemble de corpuscules, appelés photons, transportant chacun un quantum (des quanta) d'énergie.
- Un photon a une charge nulle et une masse nulle; il se déplace à la vitesse de la lumière, soit $C \approx 3.10^{8}$m/s dans le vide.
- Chaque photon d'un rayonnement monochromatique de fréquence ν transporte un quantum d'énergie: $E=h.\nu=\frac{hC}{\lambda}$ avec h la constante de Planck ($h=6{,}623.10^{-34}$ Js), C la vitesse de lumière dans le vide (en m/s) et λ la longueur d'onde dans le vide (en m). E s'exprime en joule (J).
- L'effet photoélectrique correspond à l'interaction (choc) entre un photon incident et un électron du métal avec transfert de l'énergie du photon à l'électron extrait.

2. SEUIL PHOTOÉLECTRIQUE

L'effet photoélectrique ne se produit que si l'énergie du photon incident E=hν est supérieure au travail d'extraction W_0 d'un électron du métal. ($W_0=h\nu_0$ énergie d'extraction qui ne dépend que de la nature du métal).

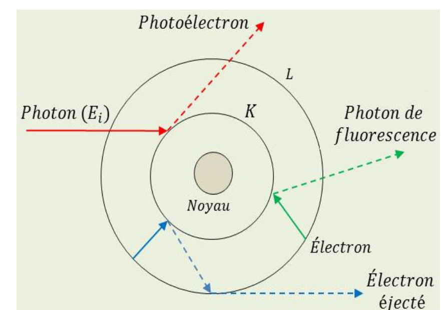
ν_0 est la fréquence seuil ($\nu_0=c/\lambda_0$), λ_0 la longueur d'onde seuil).

- si l'énergie du photon n'est pas suffisante ($\nu < \nu_0$ ou $\lambda > \lambda_0$), le photon est réfléchi et l'électron n'est pas éjecté du métal.
- si l'énergie du photon est suffisante ($\nu > \nu_0$ ou $\lambda < \lambda_0$), toute l'énergie du photon est cédée à l'électron qui sort du métal avec une vitesse d'éjection souvent non nulle.

Évaluons la vitesse d'éjection des électrons de l'atome. Soit E_C l'énergie cinétique des électrons.

$$E_C=E-W_0=h(\nu-\nu_0)=hC\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_0}\right)$$

$$\frac{1}{2}m(v_{max})^2=h(\nu-\nu_0)=hC\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_0}\right)$$



m est la masse d'un électron: $m= 9{,}1.10^{-31}$ kg.

Discussion

1) Si l'énergie du photon incident est inférieure à l'énergie de liaison El de l'électron K, l'effet photoélectrique se fait avec un électron de la couche L, etc.

2) Si le rayonnement est absorbé, l'atome est excité : son état d'énergie n'est pas l'état minimal.Il s'ensuit une relaxation (ou désexcitation): un électron d'une couche supérieure vient combler la case quantique laissée vacante par l'électron éjecté.

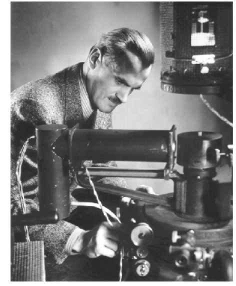
3) Si l'énergie de transition est modérée (le rayonnement incident d'énergie modérée), la relaxation provoque l'émission d'un photon de faible énergie (visible ou ultra-violet) : c'est le phénomène de fluorescence.

4) Si l'énergie de transition est élevée, deux cas peuvent se produire :

émission d'un photon fluorescent (photon X du fait de son énergie) ;

capture possible de ce photon X de nouveau par l'atome lui-même et éjection d'un électron périphérique.

II- L'effet Compton


A.H. Compton
(1892-1962)

Le comportement corpusculaire du photon et l'hypothèse de la quantification de l'énergie du photon par la longueur d'onde furent vérifiés expérimentalement en 1923 par Arthur Holly Compton pour l'observation de la diffusion du photon sur un électron. Cette expérience appelée « **effet Compton** » met en lien le **transfert d'énergie** d'un **photon** lorsqu'il entre en **collision** avec un **électron libre** (ou très faiblement lié à un atome). La **perte d'énergie** se résulte en une **augmentation** de la **longueur d'onde** du photon (diminution de la fréquence). Compton fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1927 pour cette découverte.

L'expérience démontre qu'il y aura déviation de la trajectoire d'un photon d'un angle θ en fonction de la variation de la longueur d'onde λ entre le photon avant et après la collision :

$$\lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_e c}\left(1-\cos(\theta)\right)$$

où λ_i : Longueur d'onde initiale du photon (m)

λ_f : Longueur d'onde finale du photon (m)

θ : Angle de déviation du photon initial.

h : Constante de Planck ($6{,}63\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$)

m_e : Masse de l'électron ($9{,}11\times10^{-31}\ \mathrm{kg}$)

c : Vitesse de la lumière ($c = 3\times10^{8}\ \mathrm{m/s}$)

Ce schéma est exagéré, car la variation de longueur d'onde $\lambda_f - \lambda_i$ est très peu prononcée pour la lumière visible, car $h/m_e c$ = 2,426 x 10^{-12} m. L'effet Compton devient plus remarquable chez les photons à haute fréquence comme le rayonnement X et gamma.

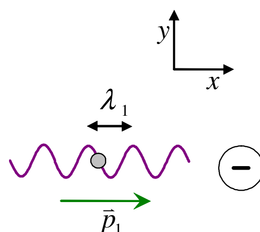
et λ_C : Longueur d'onde de Compton ($\lambda_C = \dfrac{h}{m_e c} = 2{,}426\times10^{-12}\ \mathrm{m}$)

P.S. Pour passer d'un photon de type rayon-X ($\approx 1\times10^{-11}\ \mathrm{m}$) à un photon rouge ($\approx 650\times10^{-9}\ \mathrm{m}$), il faut un minimum de **133 964 diffusions** de Compton.

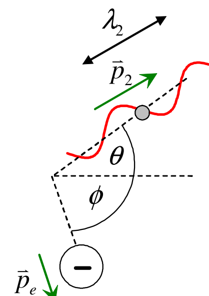
<u>Preuve :</u>

Dans le référentiel d'un laboratoire, effectuons une interaction de type « collision » entre un photon et un électron immobile. Lors de cette interaction, il y a **conservation de la quantité de mouvement** $\sum \vec{p}_f = \sum \vec{p}_i$ et **conservation de l'énergie** $\sum E_f = \sum E_i$ où l'énergie de l'électron $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ doit être considérée sous sa **forme relativiste** :

<u>Avant la collision :</u>



<u>Après la collision :</u>



Appliquons la conservation de la quantité de mouvement selon l'axe x :

$$\sum p_{xf} = \sum p_{xi} \qquad \text{(Conservation de } p_x\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad p_2 \cos(\theta) + p_e \cos(\phi) = p_1 \qquad \text{(Décomposition selon l'axe } x\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad p_e \cos(\phi) = p_1 - p_2 \cos(\theta) \qquad \text{(Isoler } p_e \cos(\phi)\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{p_e^{\,2} \cos^2(\phi) = p_1^{\,2} - 2 p_1 p_2 \cos(\theta) + p_2^{\,2} \cos^2(\theta)} \quad \textbf{(1)} \qquad \text{(Mettre l'équation au carré)}$$

Appliquons la conservation de la quantité de mouvement selon l'axe y :

$$\sum p_{yf} = \sum p_{yi}$$

$$\Rightarrow \quad p_2 \sin(\theta) + p_e \sin(\phi) = 0 \qquad \text{(Conservation de } p_y\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad p_e \sin(\phi) = -p_2 \sin(\theta) \qquad \text{(Isoler } p_e \sin(\phi)\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{p_e^{\,2} \sin^2(\phi) = p_2^{\,2} \sin^2(\theta)} \quad \textbf{(2)} \qquad \text{(Mettre l'équation au carré)}$$

Effectuons l'addition de l'équation **(1)** et **(2)** et factorisons le terme $p_e^{\,2}$ et $p_2^{\,2}$. Par la suite, appliquons l'identité trigonométrique $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$:

$$\left[p_e^{\,2} \cos^2(\phi)\right] + \left[p_e^{\,2} \sin^2(\phi)\right] = \left[p_1^{\,2} - 2 p_1 p_2 \cos(\theta) + p_2^{\,2} \cos^2(\theta)\right] + \left[p_2^{\,2} \sin^2(\theta)\right] \qquad \text{((1) + (2))}$$

$$\Rightarrow \quad p_e^{\,2}\left(\cos^2(\phi) + \sin^2(\phi)\right) = p_1^{\,2} - 2 p_1 p_2 \cos(\theta) + p_2^{\,2}\left(\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)\right) \qquad \text{(Factoriser)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{p_e^{\,2} = p_1^{\,2} - 2 p_1 p_2 \cos(\theta) + p_2^{\,2}} \quad \textbf{(3)} \qquad \text{(Identité)}$$

Appliquons maintenant la conservation de l'énergie :

$$\sum E_f = \sum E_i$$

$$\Rightarrow \quad E_{\gamma 2} + E_{ef} = E_{\gamma 1} + E_{ei} \qquad \text{(Énergie du photon et de l'électron)}$$

$$\Rightarrow \quad p_2 c + E_{ef} = p_1 c + E_{ei} \qquad \text{(Énergie du photon : } E_\gamma = pc\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad p_2 c + \sqrt{p_{ef}^{\,2} c^2 + m_e^{\,2} c^4} = p_1 c + \sqrt{p_{ei}^{\,2} c^2 + m_e^{\,2} c^4} \qquad \text{(Énergie rel. : } E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad p_2 c + \sqrt{p_e^{\,2} c^2 + m_e^{\,2} c^4} = p_1 c + m_e c^2 \qquad (p_{ei} = 0,\ p_{ef} = p_e)$$

$$\Rightarrow \quad \sqrt{p_e^{\,2} c^2 + m_e^{\,2} c^4} = p_1 c - p_2 c + m_e c^2 \qquad \text{(Isoler la racine)}$$

$$\Rightarrow \quad \sqrt{p_e^{\,2} c^2 + m_e^{\,2} c^4} = c(p_1 - p_2) + m_e c^2 \qquad \text{(Factoriser } c\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad p_e^{\,2} c^2 + m_e^{\,2} c^4 = \left(c(p_1 - p_2) + m_e c^2\right)^2 \qquad \text{(Mettre au carré de chaque côté)}$$

$$\Rightarrow \quad p_e^{\,2} c^2 + m_e^{\,2} c^4 = c^2 (p_1 - p_2)^2 + 2 m_e c^3 (p_1 - p_2) + m_e^{\,2} c^4 \qquad \text{(Développer le terme au carré)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{p_e^{\,2} = (p_1 - p_2)^2 + 2 m_e c (p_1 - p_2)} \quad \textbf{(4)} \qquad \text{(Simplifier } m_e^{\,2} c^4 \text{ et diviser par } c^2\text{)}$$

Effectuons la soustraction entre l'équation **(3)** et **(4)** afin d'obtenir la relation désirée :

$$\left[p_e^{\;2}\right]-\left[p_e^{\;2}\right]=\left[p_1^{\;2}-2p_1p_2\cos(\theta)+p_2^{\;2}\right]-\left[(p_1-p_2)^2+2m_ec(p_1-p_2)\right] \qquad \text{((3) - (4))}$$

$$\Rightarrow \quad 0=p_1^{\;2}-2p_1p_2\cos(\theta)+p_2^{\;2}-(p_1-p_2)^2-2m_ec(p_1-p_2) \qquad \text{(Simplifier)}$$

$$\Rightarrow \quad 0=p_1^{\;2}-2p_1p_2\cos(\theta)+p_2^{\;2}-\left(p_1^{\;2}-2p_1p_2+p_2^{\;2}\right)-2m_ec(p_1-p_2) \qquad \text{(Dév. le carré)}$$

$$\Rightarrow \quad 0=-2p_1p_2\cos(\theta)+2p_1p_2-2m_ec(p_1-p_2) \qquad \text{(Simplifier)}$$

$$\Rightarrow \quad 0=2p_1p_2(1-\cos(\theta))-2m_ec(p_1-p_2) \qquad \text{(Factoriser } 2p_1p_2\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad 2m_ec(p_1-p_2)=2p_1p_2(1-\cos(\theta)) \qquad \text{(Changer l'égalité)}$$

$$\Rightarrow \quad p_1-p_2=\frac{p_1p_2}{m_ec}(1-\cos(\theta)) \qquad \text{(Diviser par } 2m_ec\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{h}{\lambda_1}-\frac{h}{\lambda_2}=\frac{(h/\lambda_1)(h/\lambda_2)}{m_ec}(1-\cos(\theta)) \qquad \text{(Remplacer } p=\frac{h}{\lambda}\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{1}{\lambda_1}-\frac{1}{\lambda_2}=\frac{h}{m_ec}\frac{1}{\lambda_1\lambda_2}(1-\cos(\theta)) \qquad \text{(Simplifier } h\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda_2-\lambda_1=\frac{h}{m_ec}(1-\cos(\theta)) \qquad \text{(Multiplier par } \lambda_1\lambda_2\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda_f-\lambda_i=\frac{h}{m_ec}(1-\cos(\theta)) \quad \blacksquare \qquad \text{(Remplacer } \lambda_f=\lambda_2 \text{ et } \lambda_i=\lambda_1\text{)}$$